



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU



Fakultet  
elektrotehnike i  
računarstva

**Diplomski studij**

**Računarstvo**

Znanost o mrežama

Programsko inženjerstvo i informacijski  
sustavi

Računalno inženjerstvo

**Informacijska i komunikacijska tehnologija**

Automatika i robotika

Informacijsko i komunikacijsko inženjerstvo

**Elektrotehnika i informacijska tehnologija**

Audiotehnologije i elektroakustika

Elektroenergetika

**(Izborni predmet profila)**

# Internet stvari

## 6. Protokoli za optimizaciju mrežnog sloja: 6LoWPAN, 6TiSCH i RPL

Ak. god. 2022./2023.

# Sadržaj

- **Uređaji i mreže ograničenih resursa**
- 6LoWPAN: IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks
- 6TiSCH: IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e
- RPL: IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks

# Uređaji ograničenih resursa

Specificirani u RFC 7228

Uređaji s ograničenom memorijom, procesorom, napajanjem: smanjena sposobnost obrade podataka, mala veličina okvira pri prijenosu podataka

**Uređaji kategorije 0** imaju izrazito ograničene resurse, ne implementiraju IP stack i sigurnosne mehanizme

**Uređaji kategorije 1** ne implementiraju IP stack u cijelosti, podržavaju CoAP

**Uređaji kategorije 2** implementiraju IP stack u cijelosti

Class	Definition
Class 0	This class of nodes is severely constrained, with less than 10 KB of memory and less than 100 KB of Flash processing and storage capability. These nodes are typically battery powered. They do not have the resources required to directly implement an IP stack and associated security mechanisms. An example of a Class 0 node is a push button that sends 1 byte of information when changing its status. This class is particularly well suited to leveraging new unlicensed LPWA wireless technology.
Class 1	While greater than Class 0, the processing and code space characteristics (approximately 10 KB RAM and approximately 100 KB Flash) of Class 1 are still lower than expected for a complete IP stack implementation. They cannot easily communicate with nodes employing a full IP stack. However, these nodes can implement an optimized stack specifically designed for constrained nodes, such as Constrained Application Protocol (CoAP). This allows Class 1 nodes to engage in meaningful conversations with the network without the help of a gateway, and provides support for the necessary security functions. Environmental sensors are an example of Class 1 nodes.
Class 2	Class 2 nodes are characterized by running full implementations of an IP stack on embedded devices. They contain more than 50 KB of memory and 250 KB of Flash, so they can be fully integrated in IP networks. A smart power meter is an example of a Class 2 node.

# Mreža ograničenih resursa (1/2)

## *Constraint network, low-power and lossy networks (LLNs)*

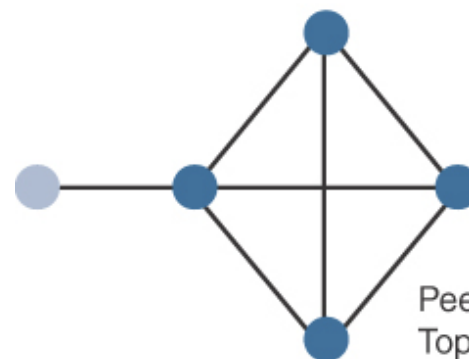
- bežična mreža čvorova s ograničenim izvorom energije
- potencijalno dugi periodi neaktivnosti čvorova (čak do 99% vremena), mali generirani promet
- ograničena širina pojasa i propusnost: od nekoliko do par stotina kbit/s
- „težak” radijski kanal
  - nelicencirani spektar (*industrial, scientific, and medical*, ISM)
  - šum, interferencija, kolizija paketa
  - nestabilan sloj linka: česte i isprekidane pogreške ili potpuni gubitak veze
  - s obzirom na ograničenu propusnost, ne preporučuje se brza retransmisija: „*A constrained network that overreacts can lead to a network collapse—which makes the existing problem worse*”.

# Mreža ograničenih resursa (2/2)

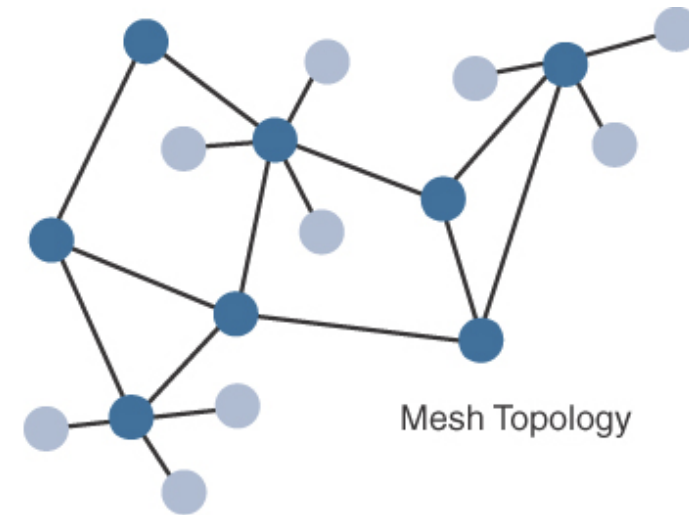
- Koriste sljedeće topologije: *star, mesh, P2P*
- Minimizirati signalizacijski promet
- Uzeti u obzir potrošnju energije za komunikaciju
- tipične pristupne tehnologije:
  - IEEE 802.15.4 (Wireless Personal Area Networks, WPAN),
  - IEEE 802.15.1 (Bluetooth),
  - LoRa i Sigfox (Low-Power Wide-Area, LPWA),
  - IEEE 802.11ah (Wi-Fi)



Star Topology



Peer-to-Peer Topology

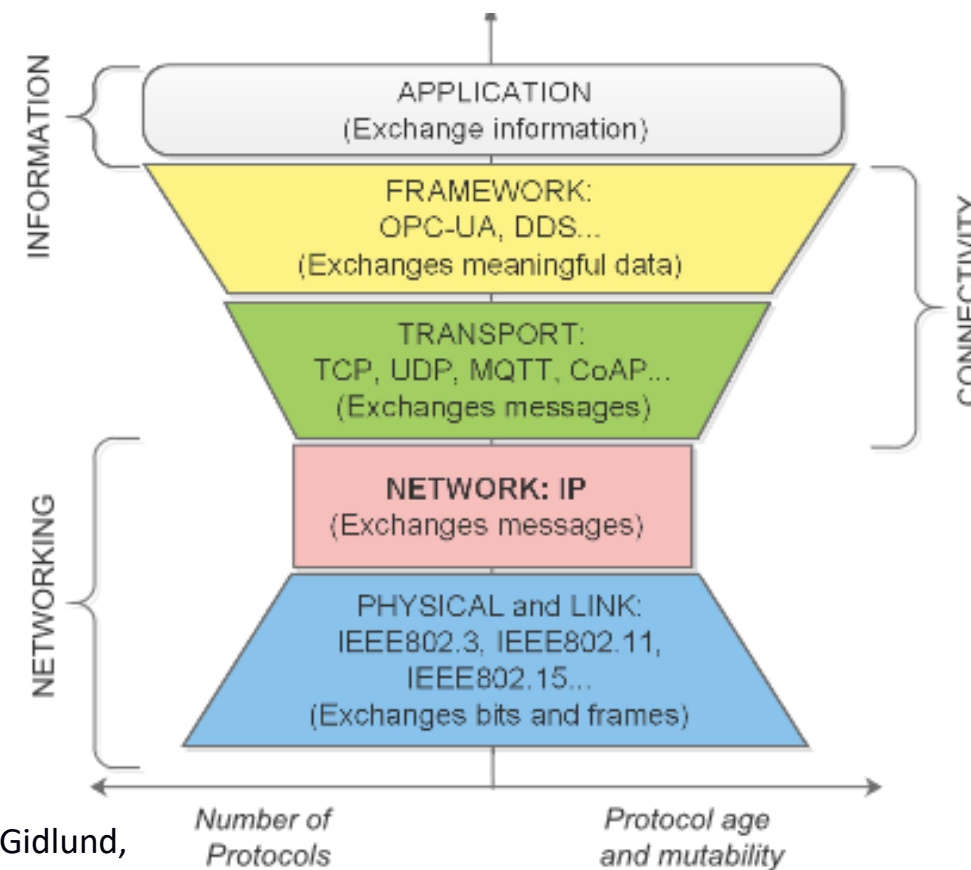


Mesh Topology

- Full Function Device
- Reduced Function Device

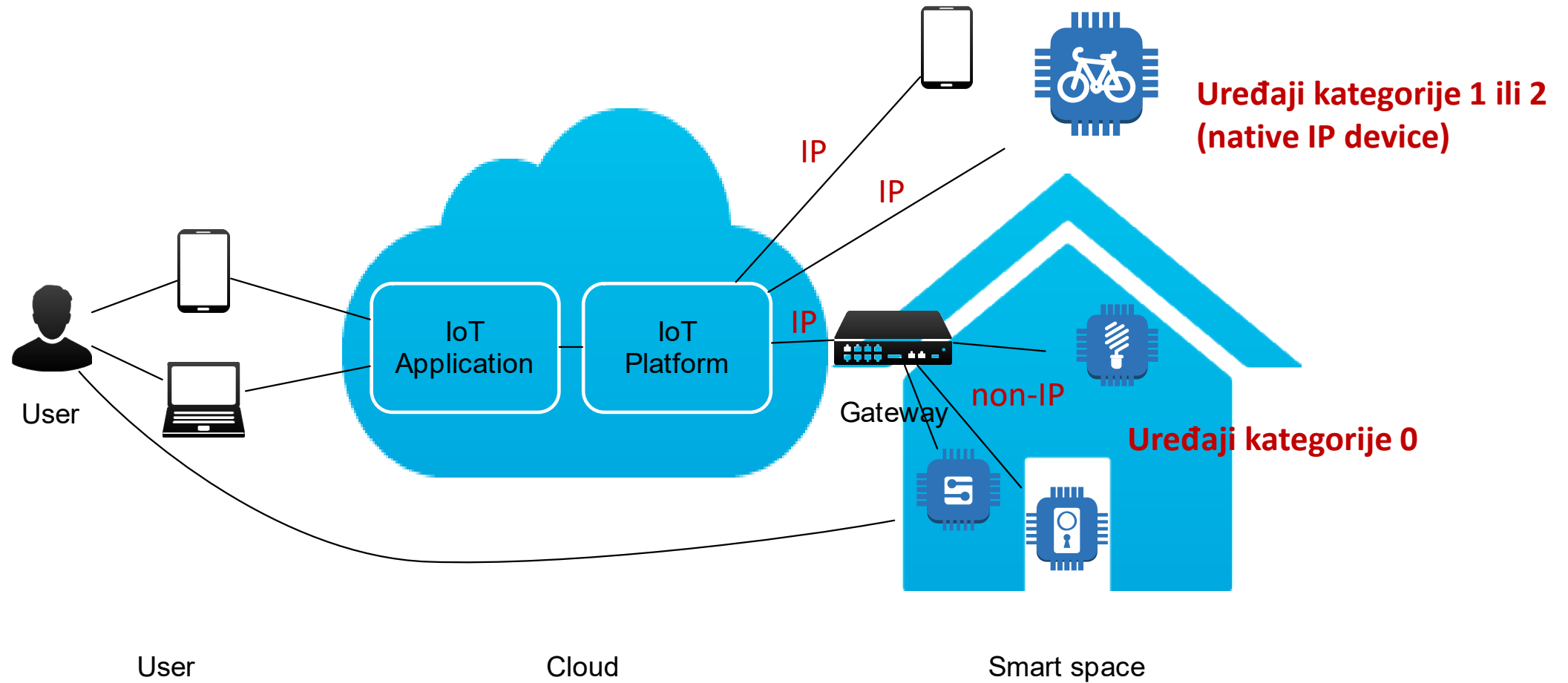
# Zašto je IP prikladan za umrežavanje „stvari”?

- IP je jedinstven sloj neovisan o nižim i višim slojevima IP *stack*-a
- Otvoren, skalabilan, stabilan: IPv4 RFC 79 iz 1981, IPv6 RFC 2460 iz 1998
- Potrebne su optimizacije na svim slojevima IP *stack*-a s obzirom na ograničene resurse IoT-uređaja i mreža
- **Ponovite osnove protokola IP, Komunikacijske mreže, [5. predavanje](#)**



Izvor: E. Sisinni, A. Saifullah, S. Han, U. Jennehag and M. Gidlund, "Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 11, pp. 4724-4734, Nov. 2018.

# Prilagodba ili usvajanje IP-a



# Kako umrežiti uređaje ograničenih resursa?

- **Uređaji kategorije 0:** rijetko komuniciraju, prenose nekoliko byte-ova, ograničene sigurnosne i upravljačke mehanizme
- **Uređaji kategorije 1:** imaju dovoljno resursa za implementaciju IP stack prilagođen hw za direktnu komunikaciju s poslužiteljem ili putem posrednika.
- **Uređaji kategorije 2:** resursi su usporedivi s resursima osobnog računala, podržavaju puni IP stack, ali treba voditi računa o ograničenjima pristupne tehnologije

**Prilagodba** (*adaptation*): koristi neku vrstu prilaza (*gateway*) za prijevod IP paketa na ne-IP pakete.

**Usvajanje** (*adoption*): zamjenjuje postojeće non-IP-slojeve IP-slojevima na samome uređaju.

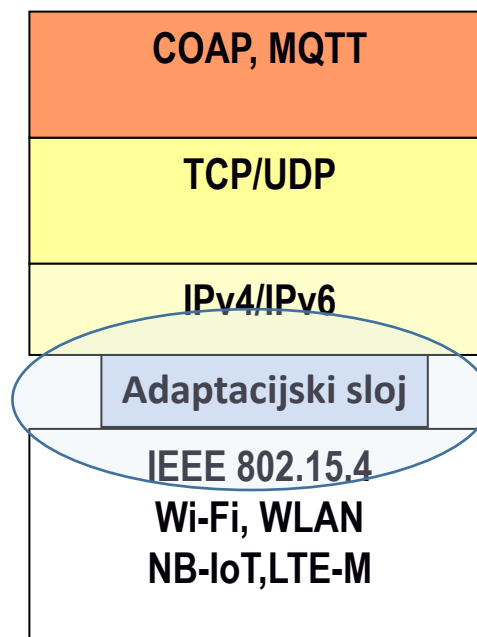


# Prilagodba protokolnog složaja za IoT

## TCP/IP



## IoT



Kako zapakirati IP pakete u okvire na nižem sloju podatkovne poveznice?

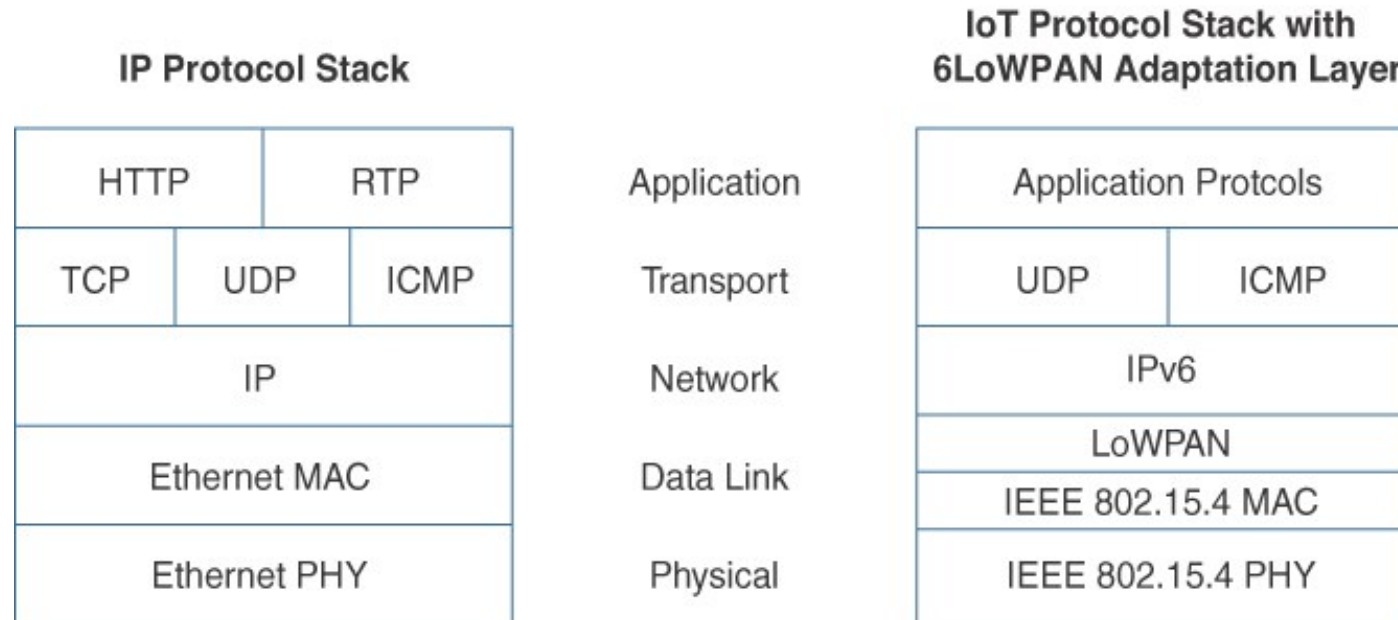
Treba li rješenje jednosmjernu ili dvosmjernu komunikaciju?  
(Ako nije jednosmjerna, neće biti moguće udaljeno održavanje, software/firmware update)

# Sadržaj

- Uređaji i mreže ograničenih resursa
- **6LoWPAN: IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks**
- 6TiSCH: IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e
- RPL: IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks

# Općenito o 6LoWPAN

- 6LoWPAN: IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks
- prilagodba IP-a za **IEEE 802.15.4**



Cilj: optimizacija  
prijenosa IPv6-paketa u  
mrežama s ograničenim  
resursima (IEEE 802.15.4)

# Izazovi za prilagodbu 6LoWPAN

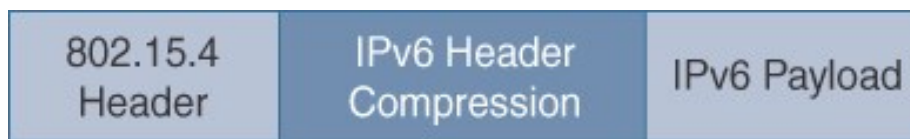
- Najmanji maximum transmission unit (MTU) za IPv6 je 1280 okteta, dok je 127 okteta najveća veličina okvira za IEEE 802.15.4
- Potrebni su mehanizmi prilagodbe:
  - Kompresija zaglavlja
  - Fragmentacija paketa
  - Mesh-adresiranje

## Header Size Calculation

- IPv6 header is 40 octets, UDP header is 8 octets
- 802.15.4 MAC header can be up to 25 octets (null security) or  $25+21=46$  octets (AES-CCM-128)
- With the 802.15.4 frame size of 127 octets, we have only following space left for application data!
  - $127-25-40-8 = 54$  octets (null security)
  - $127-46-40-8 = 33$  octets (AES-CCM-128)

# Mehanizmi prilagodbe 6LoWPAN-a za IEEE802.15.4

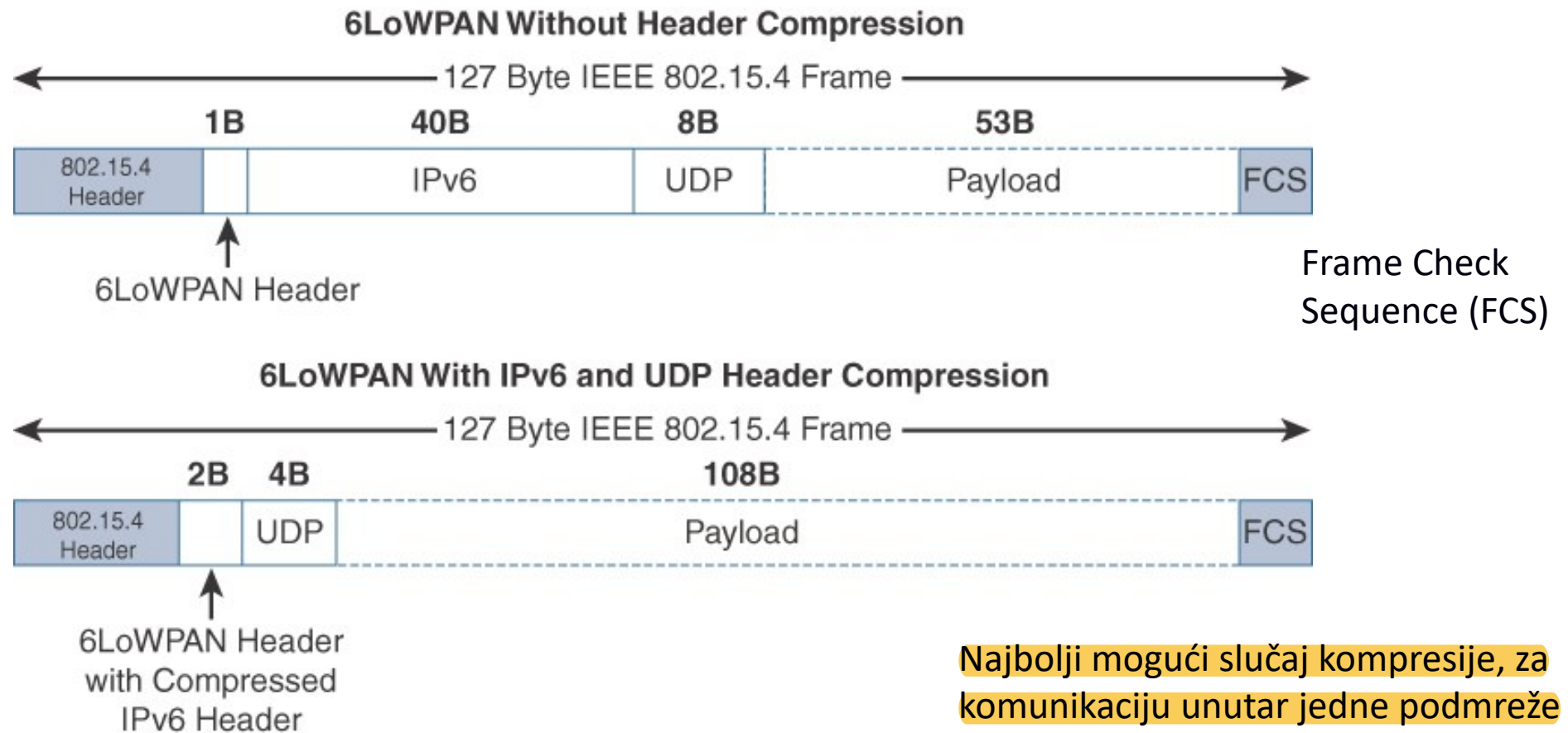
- RFC 4994: definira zaglavlja za kompresiju, fragmentaciju i *mesh*-adresiranje
- U konkretnoj implementaciji se može koristiti kombinacija navedenih mehanizama



# Kompresija zaglavlja

- Uklanja se redundantna informacija na nivou linka, mreže i transportnog sloja
  - Kompresija HC1 (IPv6 header) i HC2 (UDP header): može u nekim slučajevima kombinirano dva zaglavlja IPv6 (40-byte) i UDP (8-byte) svesti na 6 byte-a
  - Polja u zaglavlju IPv6 se odbacuju kada ih sloj prilagodbe može zaključiti iz okvira 802.15.4
  - Koristi se jednostavna pretpostavka o dijeljenom kontekstu (lokalnoj podmreži)
  - Izostavljaju se standardna zaglavlja i pretpostavljaju opće korištene vrijednosti
- *Stateless*
- Definirana u RFC 4944 i RFC 6282

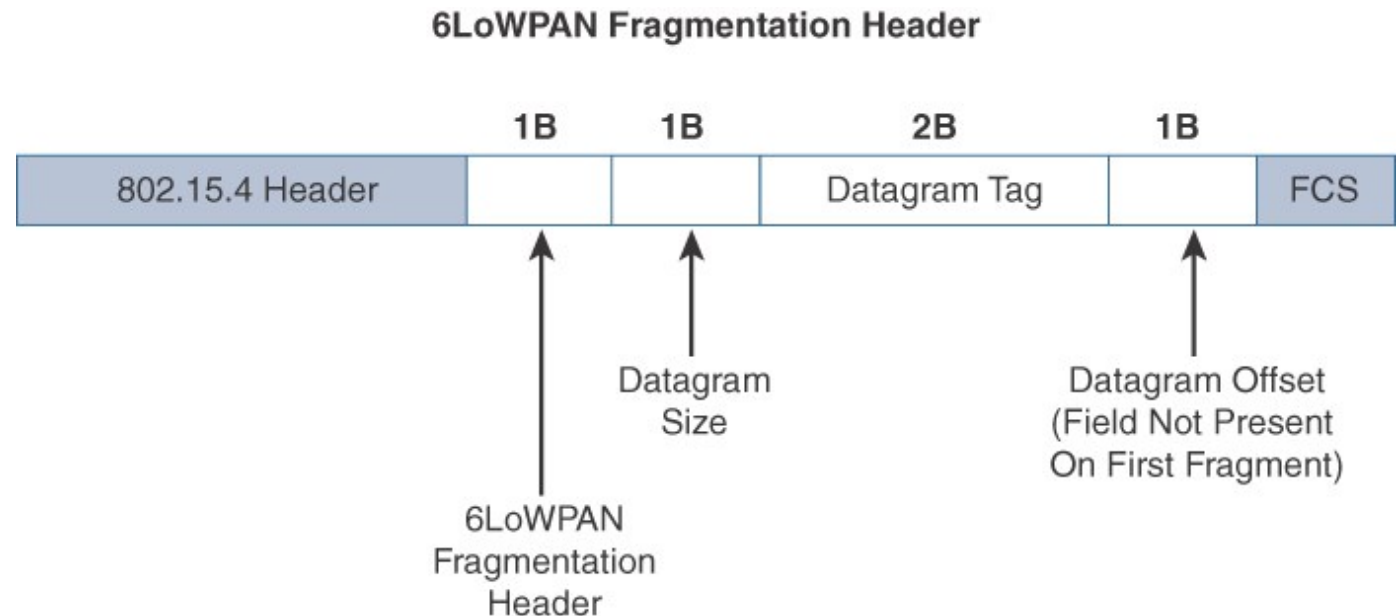
# Kompresija zaglavlja (primjer)



Najbolji mogući slučaj kompresije, za komunikaciju unutar jedne pod mreže

# Fragmentacija

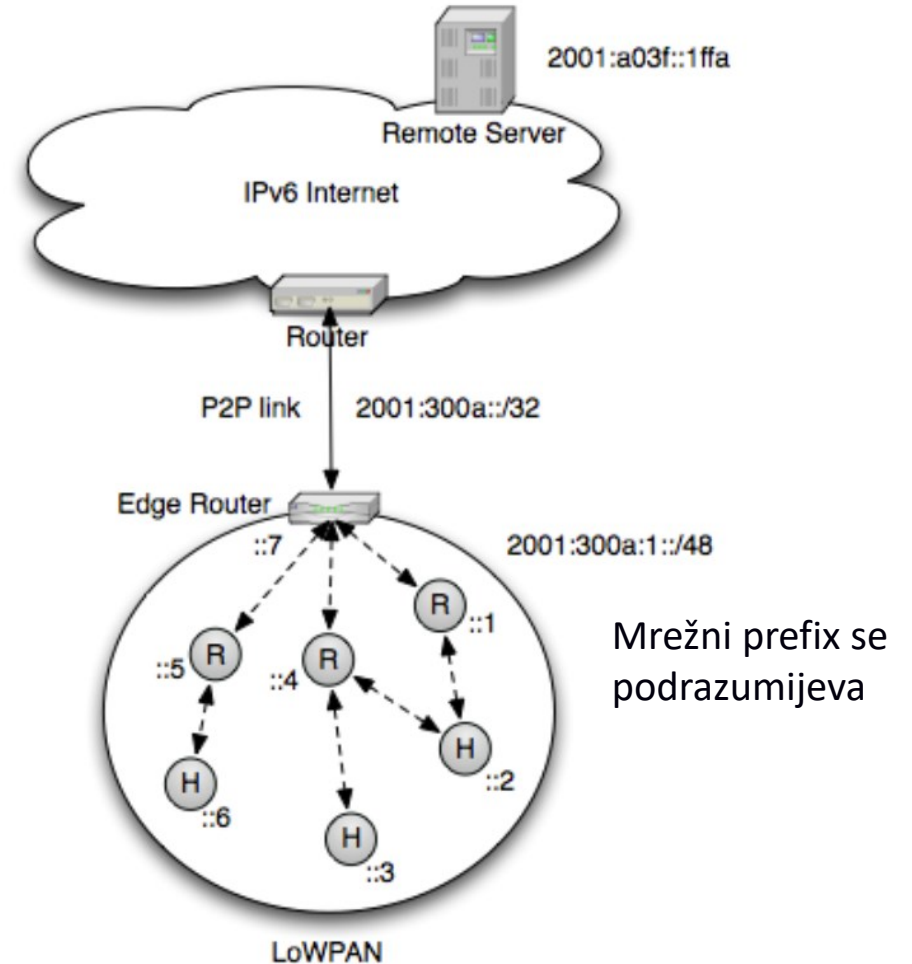
- Veliki paketi IPv6 (1280 bytes) se moraju razložiti na više manjih okvira 802.15.4 (127 bytes)
- Svi dijelovi (fragmenti) istog IP paketa imaju istu oznaku (*Datagram Tag*)
- *Datagram Size* definirana ukupnu veličinu originalnog paketa
- *Datagram offset* – pomak fragmenta u odnosu na paket
- Fragmenti ne moraju stići ispravnim redoslijedom, ali moraju unutar 60 s





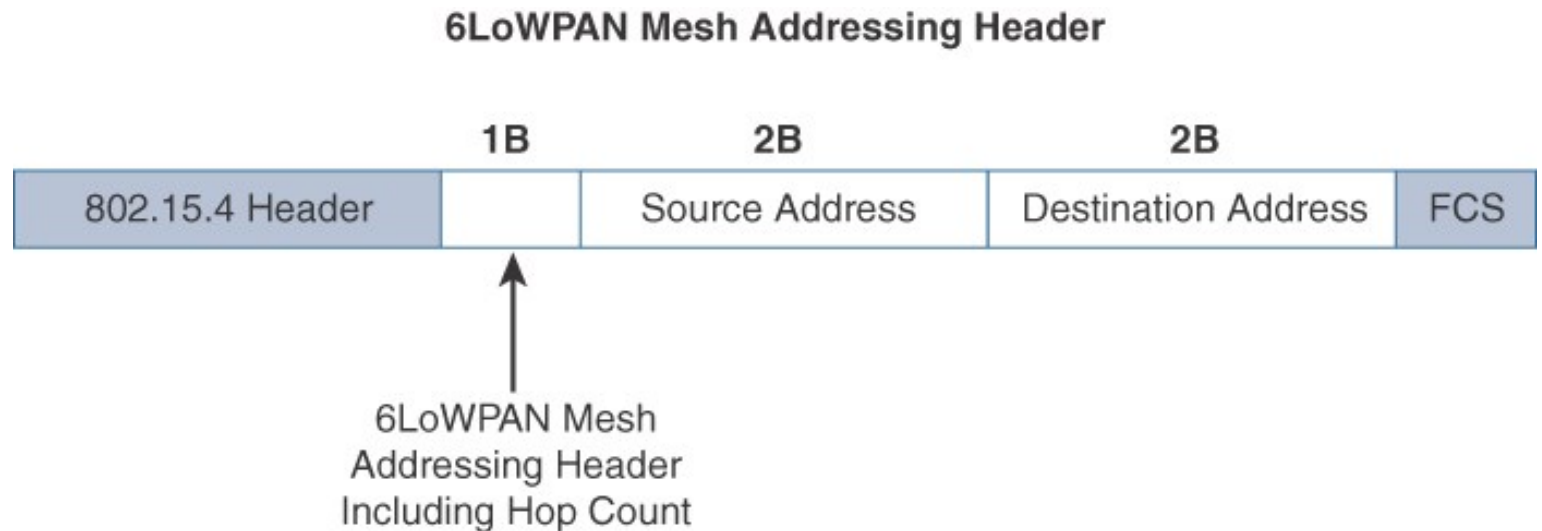
# Mesh-adresiranje (1/2)

- za usmjeravanje paketa preko više čvorova ali u jednoj podmreži (naravno IEEE 802.15.4)
- pretpostavka
  - *flat address spaces* (6LoWPAN mreža se razmatra kao 1 podmreža IPv6 s jedinstvenom MAC adresom)
- **Kompresija IPv6 adresa za 6LoWPAN**
  - izbacuju se svi podaci koji se mogu zaključiti iz „konteksta”
  - izbacuje se IPv6 prefix jer je poznat svim čvorovima u podmreži



# Mesh-adresiranje (2/2)

- Zaglavlje sadrži: Hop Limit, Source Address i Destination Address.
- Hop Limit: definira koliko puta se okvir može proslijediti, svaki čvor ga smanjuje za 1. Kada je 0, okvir se odbacuje
- Source Address i Destination Address:  
IEEE 802.15.4 adrese

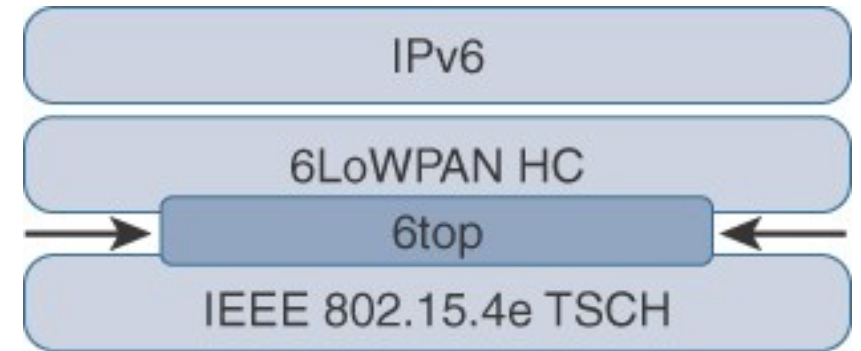


# Sadržaj

- Uređaji i mreže ograničenih resursa
- 6LoWPAN: IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks
- **6TiSCH: IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e**
- RPL: IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks

# 6TiSCH

- 6TiSCH: IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e
- IEEE 802.15.4e koristi Time-Slotted Channel Hopping (TSCH) koji se temelji na
  - **Time Division Multiple Access (TDMA):** susjedni uređaji komuniciraju prema dogovorenom rasporedu koristeći alocirani vremenski odsječak (*time slot*)
- Pouzdanost komunikacije, pogodno za industrijske primjene



6top, a sublayer that glues together the MAC layer and 6LoWPAN adaptation layer.

# 6top

- 6top omogućuje višim slojevima upravljanje nad IEEE 802.15.4e uređajima: konfiguracija i kontrola procedura za upravljanje TSCH
- Potrebno je sinkronizirati slanje i primanje okvira pomoću posebnog *scheduling* algoritma koji definira kako se koriste vremenski odsjecci.
- Scheduling utječe na propusnost, kašnjenje i potrošnju energije.
- 6top omogućuje susjednim čvorovima pregovaranje o ćelijama koje će koristiti za komunikaciju
  - ćelija definira vremenski odsječak i frekvencijski kanal za komunikaciju

# 6TiSCH schedule management mechanisms

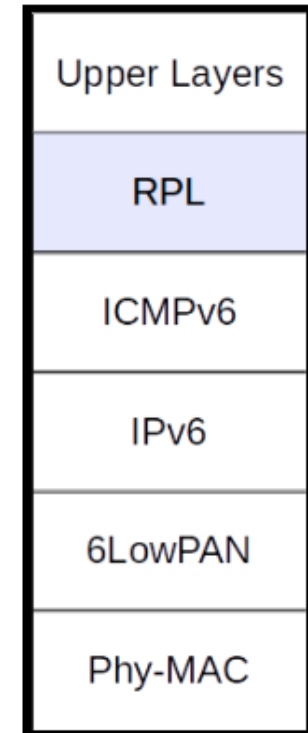
- **Statični:** svi čvorovi u mreži dijele statični raspored ćelija (raspored definira npr. administrator).
  - najjednostavniji mehanizam za implementaciju, predlaže se za inicijalnu komunikaciju
  - čvorovi su konstantno u stanju osluškivanja jer mogu primiti okvir u svakoj ćeliji, bespotrebno se troši puno energije.
- **Neighbor-to-neighbor scheduling:** definira se raspored na temelju opažanja komunikacije između čvorova.
  - Ćelije se dodaju ili oduzimaju u skladu s komunikacijskim potrebama.
- Detalji su definirani u RFC 9030 **An Architecture for IPv6 over the Time-Slotted Channel Hopping Mode of IEEE 802.15.4 (6TiSCH)** iz svibnja 2021.

# Sadržaj

- Uređaji i mreže ograničenih resursa
- 6LoWPAN: IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks
- 6TiSCH: IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e
- **RPL: IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks**

# RPL

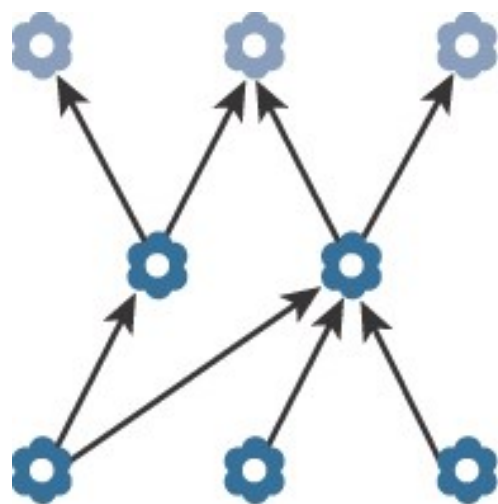
- IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks
- Definiran u RFC-u 6550
- Novi protokol za usmjeravanje paketa u mrežama ograničenih resursa (*distance-vector routing protocol*) na mrežnom sloju
- Svaki čvor može postati usmjeritelj (*mesh* topologija) na mrežnom sloju (*layer 3*) – postoje 3 vrste čvorova
- Izgrađuje se posebno stablo (DODAG) koristeći kontrolne poruke koje prenosi protokol Internet Control Message Protocol (ICMPv6) (stoga je RPL iznad sloja ICMPv6)
- Ne koristi informaciju s MAC sloja za usmjeravanje poruka





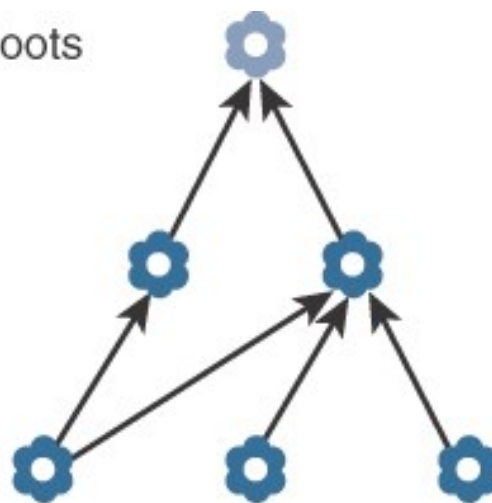
# RPL: pretpostavke

- **DAG: Directed Acyclic Graph**
  - Usmjereni graf bez usmjerenih petlji, poruka se u DAG-u ne može vratiti do čvora koji je izvorno generira



DAG

DAG Roots



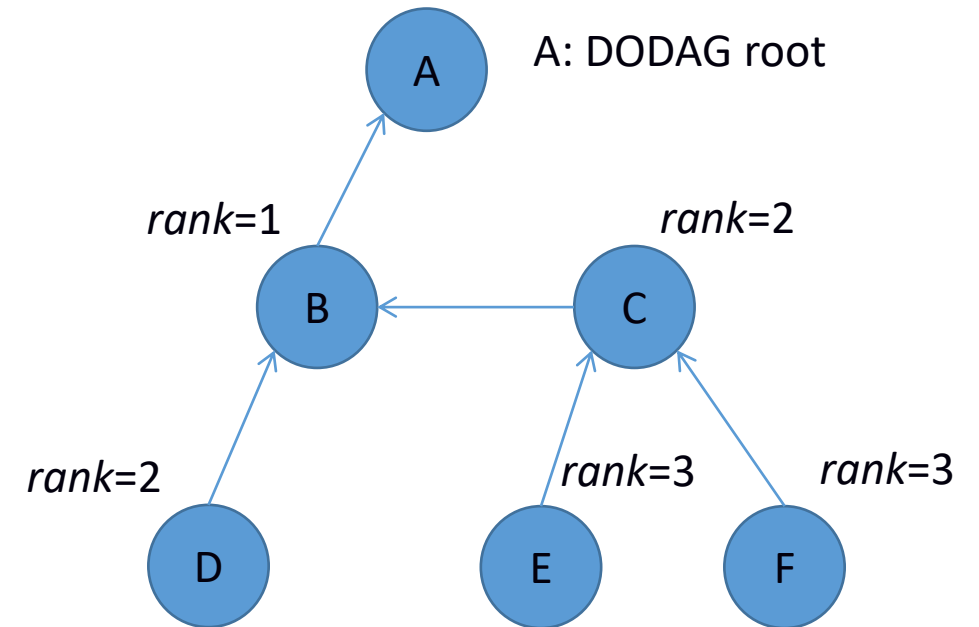
DODAG

- **DODAG: Destination-Oriented DAG**
  - DAG s jednim korijenskim čvorom
  - svaki čvor održava do tri roditelja koji osiguravaju put do korijena (jedan je preferirani roditelj, tj. preferirani sljedeći skok za rute prema gore prema korijenskom čvoru)
  - Korijenski čvor za RPL zapravo je rubni usmjeritelj koji povezuje mrežu čvorova ograničenih resursa s Internetom

# RPL DODAG: vrste čvorova

- **DODAG root:** korijenski čvor, zadužen za inicijalizaciju topologije, održava stanje (proaktivno) o topologiji DODAG. To je zapravo rubni usmjeritelj
- **RPL Router Node:** uređaj koji može generirati i usmjeravati RPL pakete. Nalazi se između čvorova root i leaf i sadrži routing info za sve svoje čvorove djecu (za storing mode).
- **RPL Leaf Node:** uređaj na dnu topologije i usmjerava samo vlastite pakete prema čvoru roditelju.

*The **rank** is a rough approximation of how “close” a node is to the root and helps avoid routing loops and the count-to-infinity problem.*

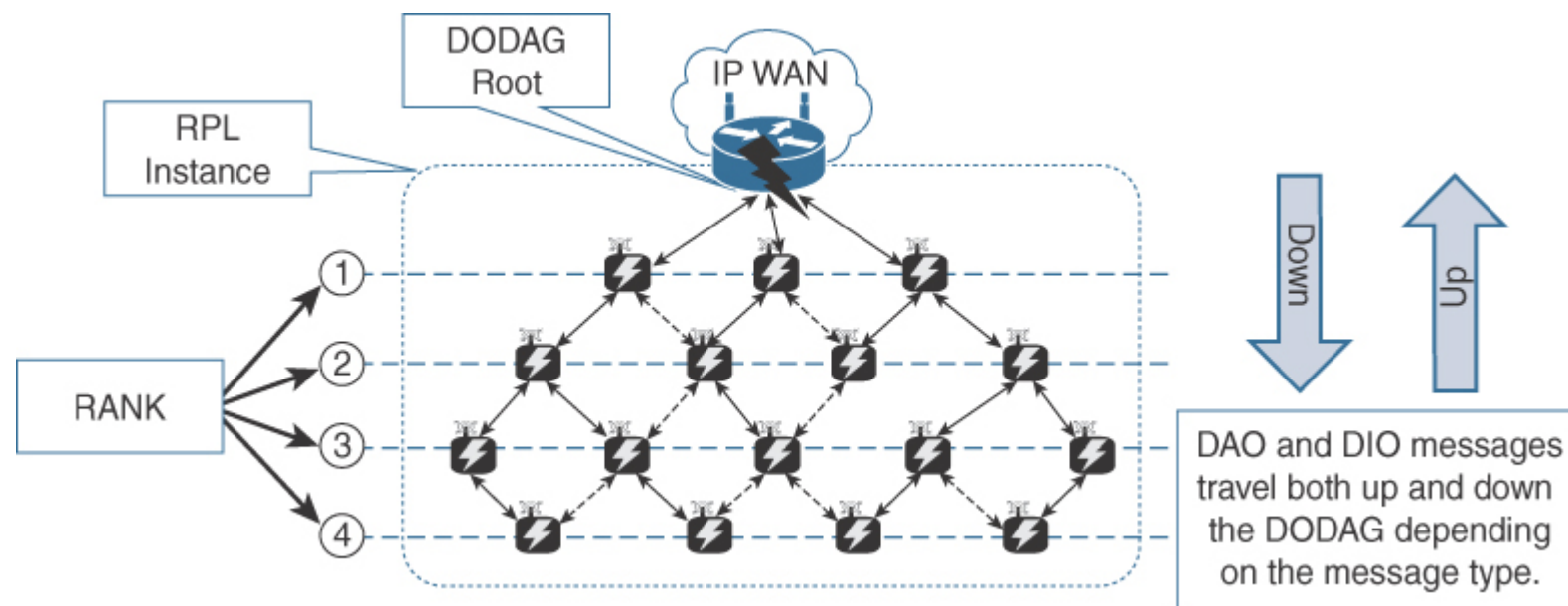


B, C: RPL router nodes

D, E, F: RPL leaf nodes

# RPL: otkrivanje rute

- DODAG Information Solicitation (DIS)
- DAG Information Object (DIO)
- Destination Advertisement Object (DAO)



# Kontrolne poruke RPL-a

- **DODAG Information Solicitation (DIS)**: čvor šalje svojim susjedima kada od njih zahtijeva informaciju o usmjeravanju tj. DODAG Information Object (DIO). Poruka DIS je slična poruci Router Solicitation koju koristi protokol IPv6 Neighbour Discovery protocol
- **DODAG Information Object (DIO)**: odgovor na poruku DIS, sadrži informaciju o roditelju i rangu u DODAG-u, čvor je koristi kako bi održavao informaciju o DODAG-u u kojem se nalazi (tko mu je čvor-roditelj i koji mu je rang u DODAG-u), a može biti član i većeg broja DODAG-a
- **Destination Advertisement Object (DAO)**: omogućuje propagaciju informacije o svakom pojedinom čvoru prema korijenskom čvoru. Odgovor na DAO je poruka DAO-ACK.

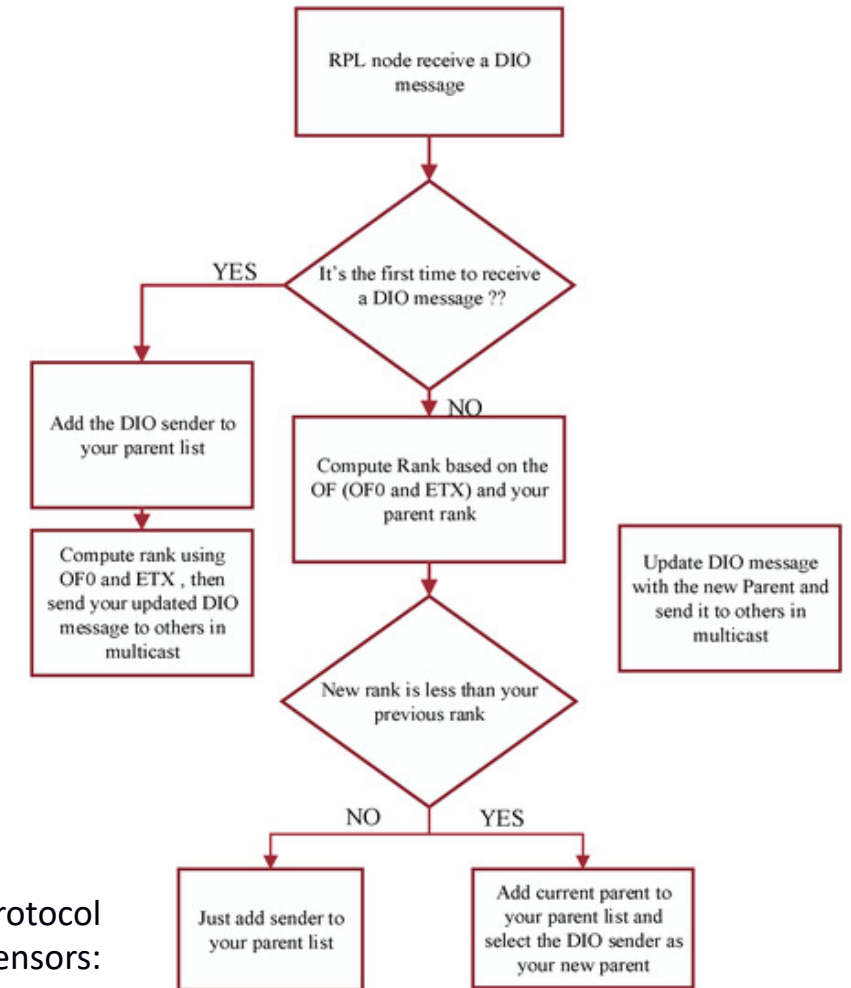
# RPL: dva načina rada

- **Storing mode:** Svi čvorovi održavaju potpunu tablicu usmjeravanja za jednu RPL domenu. Svaki čvor zna odrediti put prema svim ostalim čvorovima u podmreži RPL.
- **Non-storing mode:** Samo rubni usmjeritelj RPL domene sadrži potpunu tablicu usmjeravanja i zna odrediti put do krajnjeg čvora. Svi ostali čvorovi održavaju samo listu roditelja za usmjeravanje prema rubnom usmjeritelju.
  - Ovo je učinkovito rješenje na nivou čvora (štedi memoriju i CPU), ali koji su nedostaci?

# Pravila za usmjeravanje poruka DIO

- služi za otkrivanje ruta prema korijenskom čvoru i odabir roditelja
- čvorovi kontinuirano primaju DIO poruke zbog promjena u topologiji mreže
- korijenski čvor pokreće izgradnju novog DODAG tako da šalje poruku DIO svojim susjedima, šalju se kao odgovor na poruku DIS
  - DODAGID: koristi se za identifikaciju korijenskog čvora i njegovog grafa DODAG

Izvor: Abdel Hakeem, S.A.; Hady, A.A.; Kim, H. RPL Routing Protocol Performance in Smart Grid Applications Based Wireless Sensors: Experimental and Simulated Analysis. *Electronics* **2019**, *8*, 186.



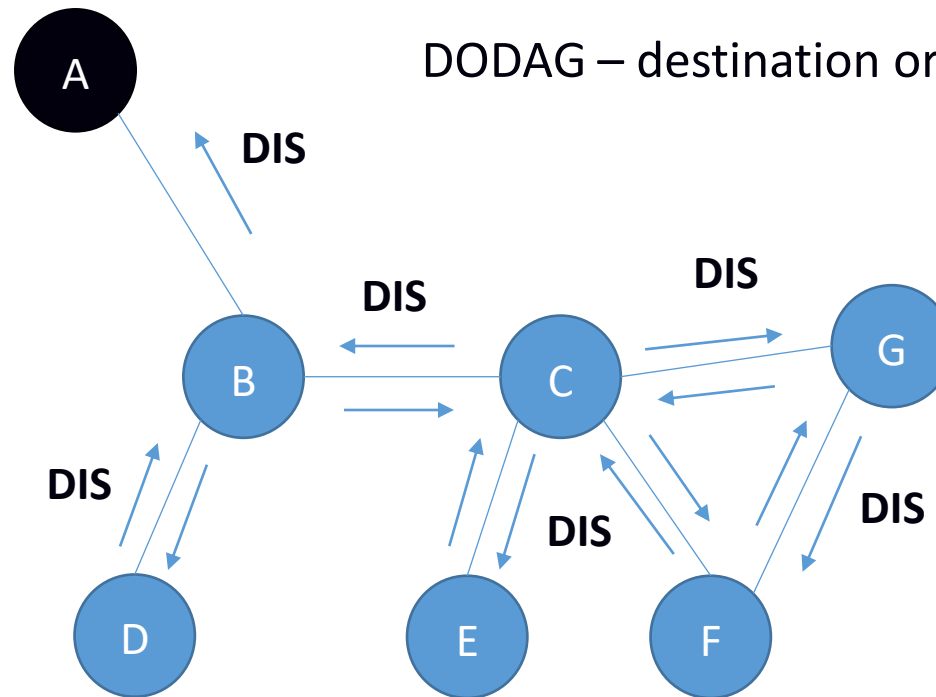
# Pravila za usmjeravanje DAO

- DAO se koristi za kreiranje ruta od korijenskog čvora prema rubnim čvorovima
- čvorovi u DAO poruci navode svoje roditelje i šalju to poruku prema korijenskom čvoru
- DAO poruke su korisne i za roditeljske čvorove jer ih obavještavaju o „djeci” (*nodes are up and running*) te se koriste za održavanje tablice usmjeravanja na svim čvorovima (za **storing mode** rada)
- U slučaju **non-storing mode DAO** poruke se šalju samo do korijenskog čvora

# RPL – izgradnja grafa (1)

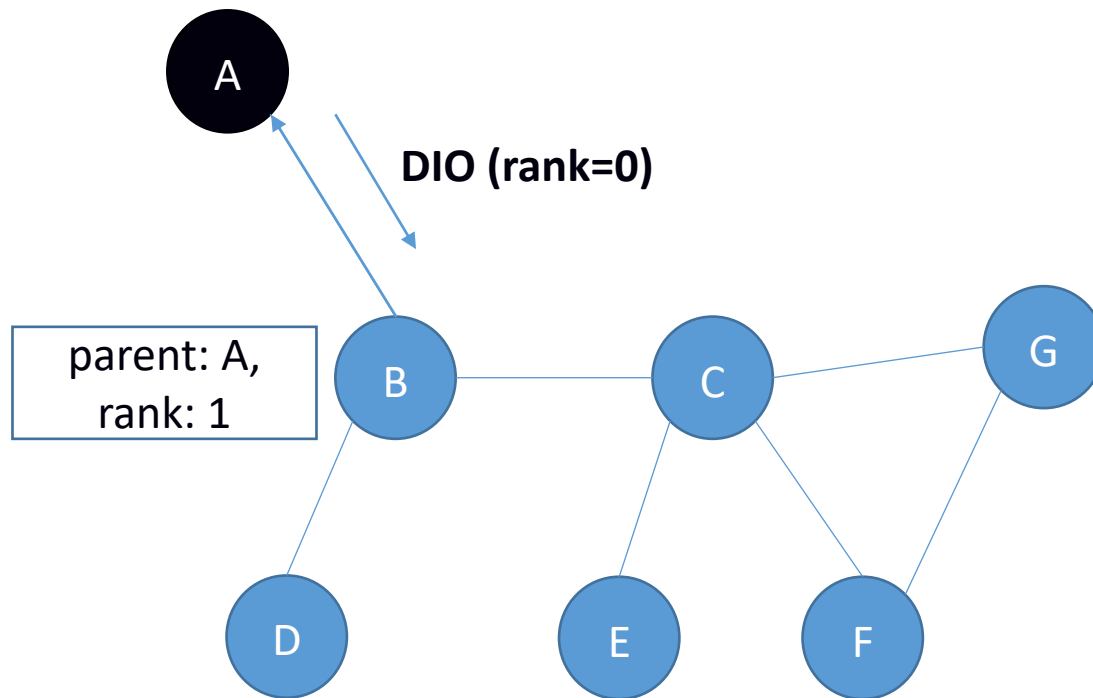
DIS - DODAG Information Solicitation

DODAG – destination oriented acyclic graph

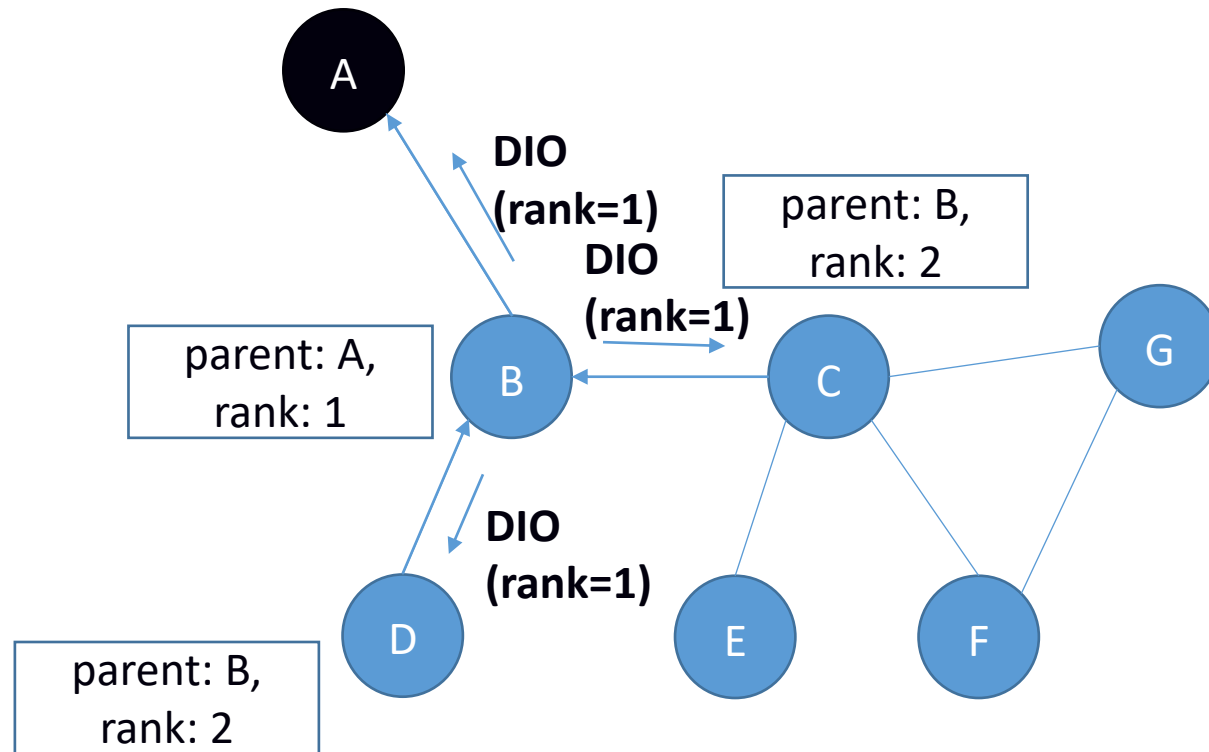




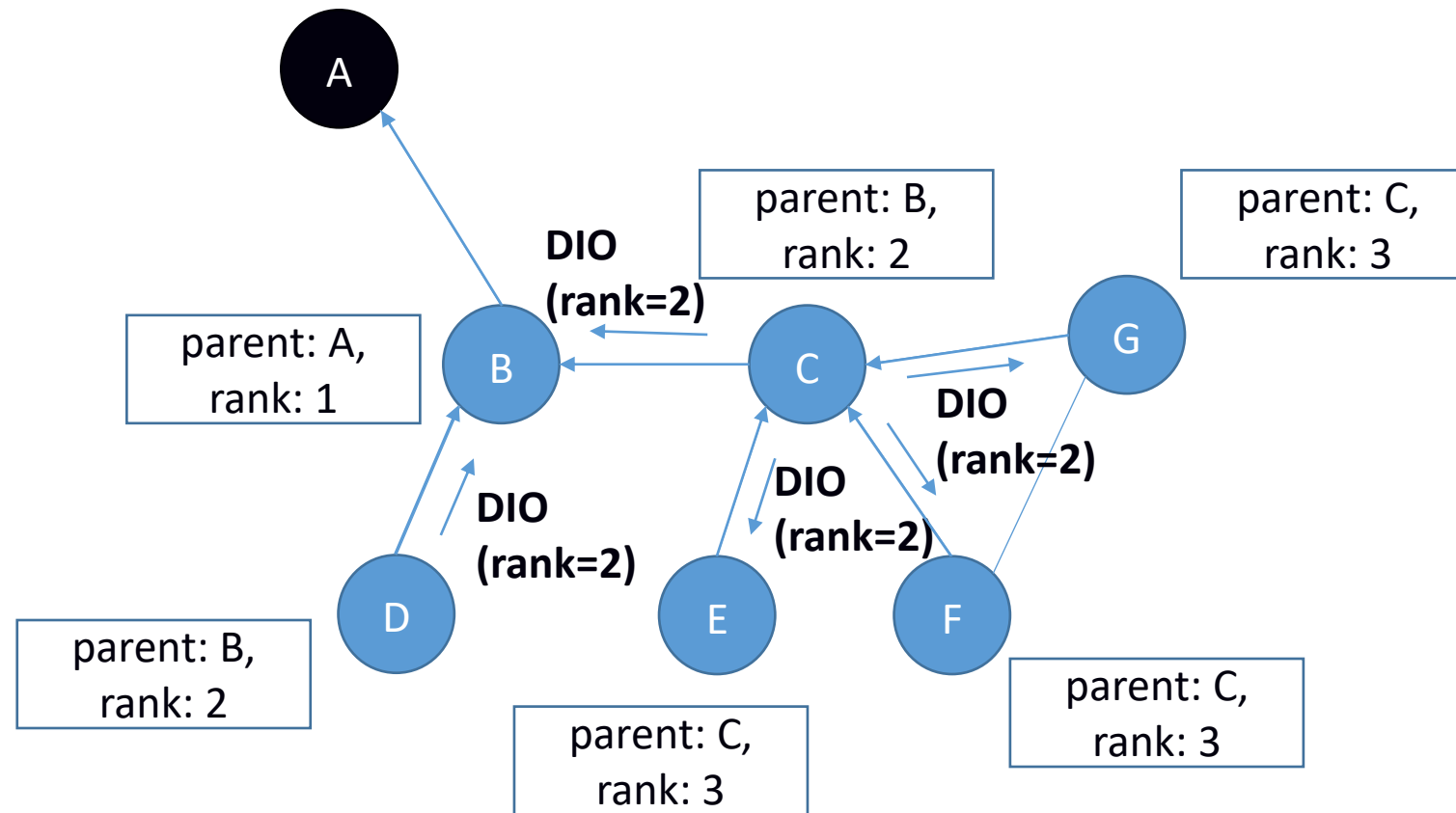
# RPL – izgradnja grafa (2)



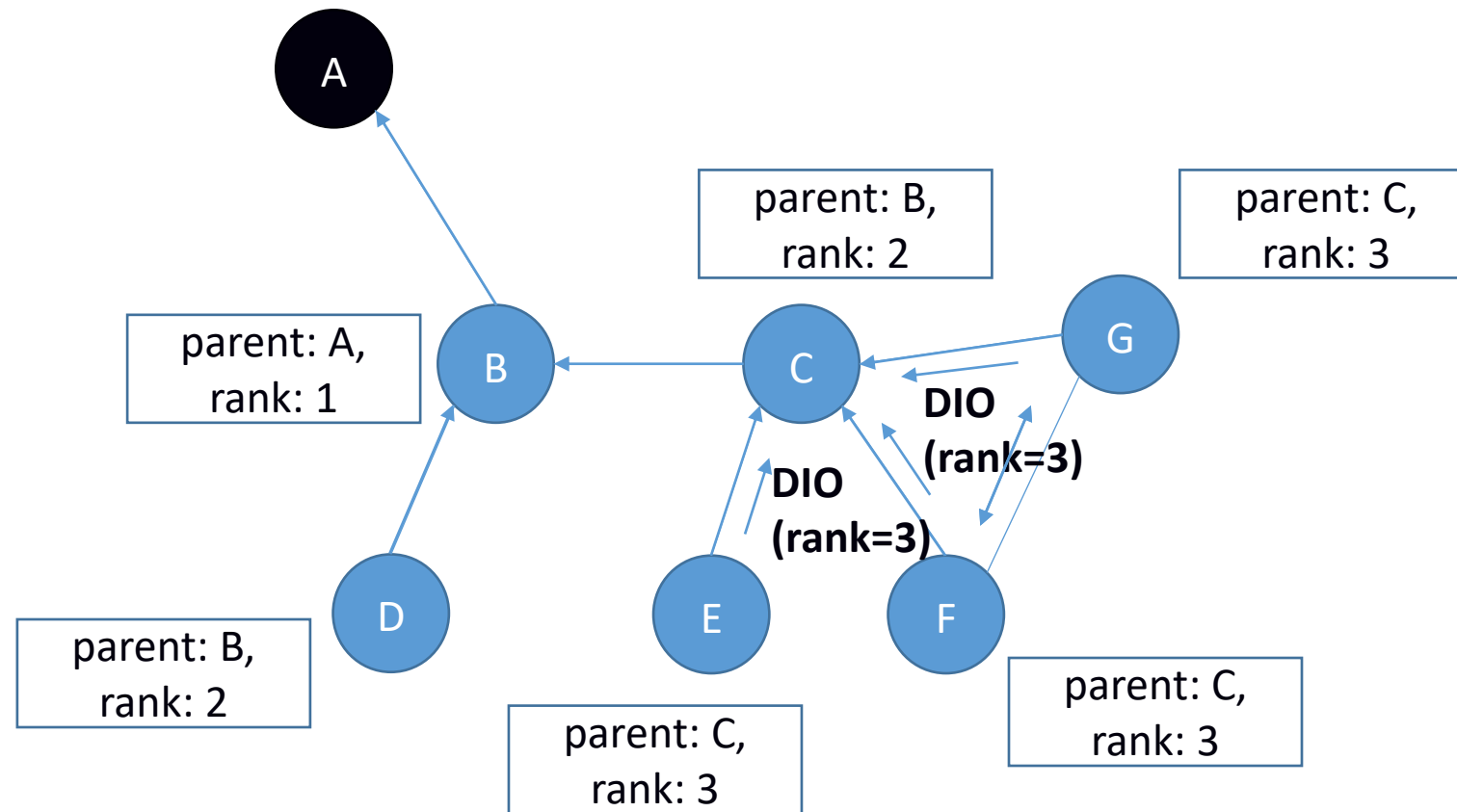
# RPL – izgradnja grafa (3)



# RPL – izgradnja grafa (4)



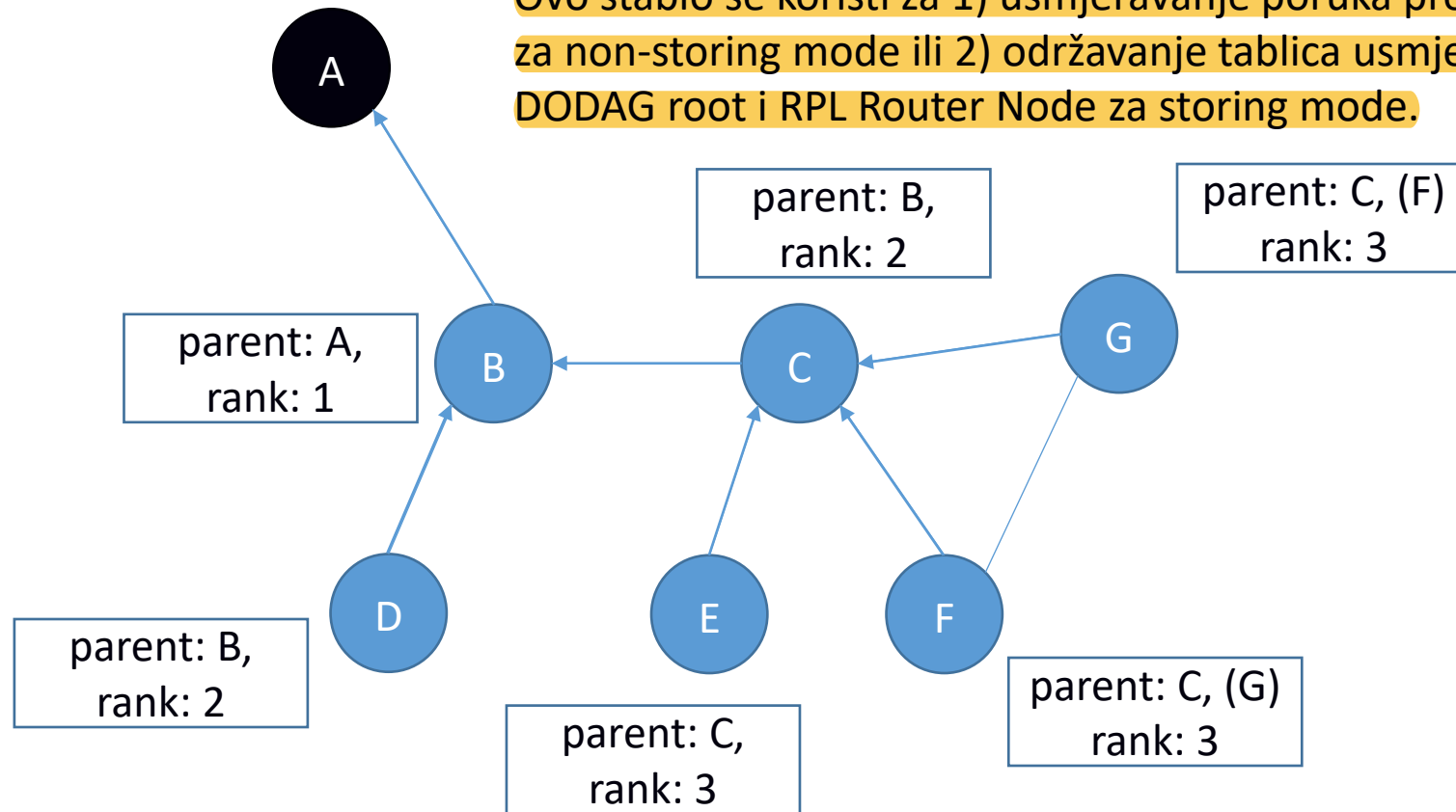
# RPL – izgradnja grafa (5)



# RPL – izgradnja grafa (6)

Nastalo je stablo (DODAG): svaki čvor ima primarnog roditelja (čvorovi F i G poznaju drugog potencijalnog roditelja).

Ovo stablo se koristi za 1) usmjeravanje poruka prema DODAG root za non-storing mode ili 2) održavanje tablica usmjeravanja na DODAG root i RPL Router Node za storing mode.

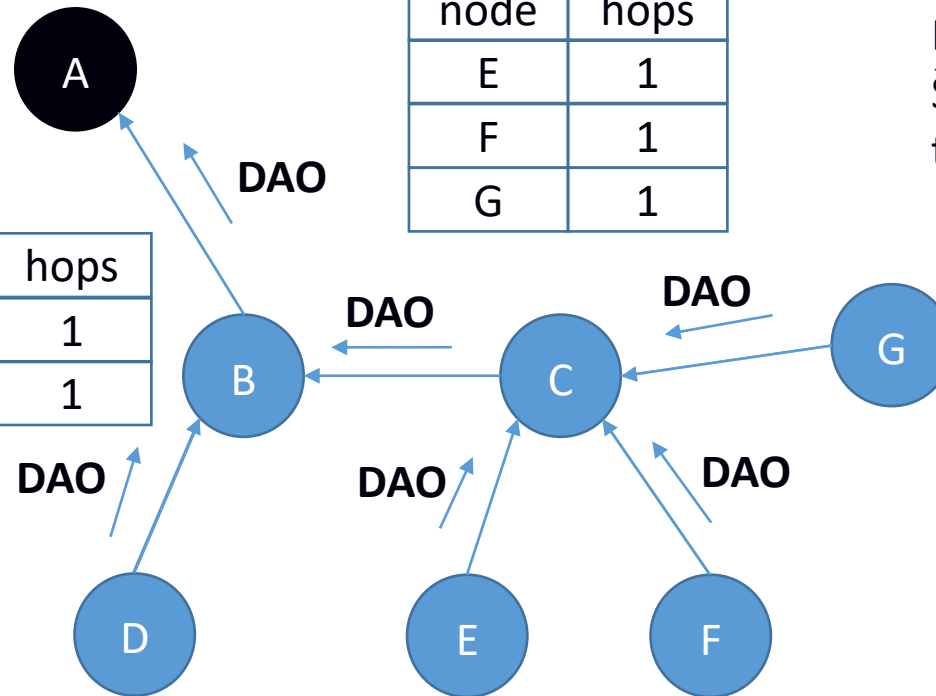


# RPL – storing mode (1)

node	hops
B	1

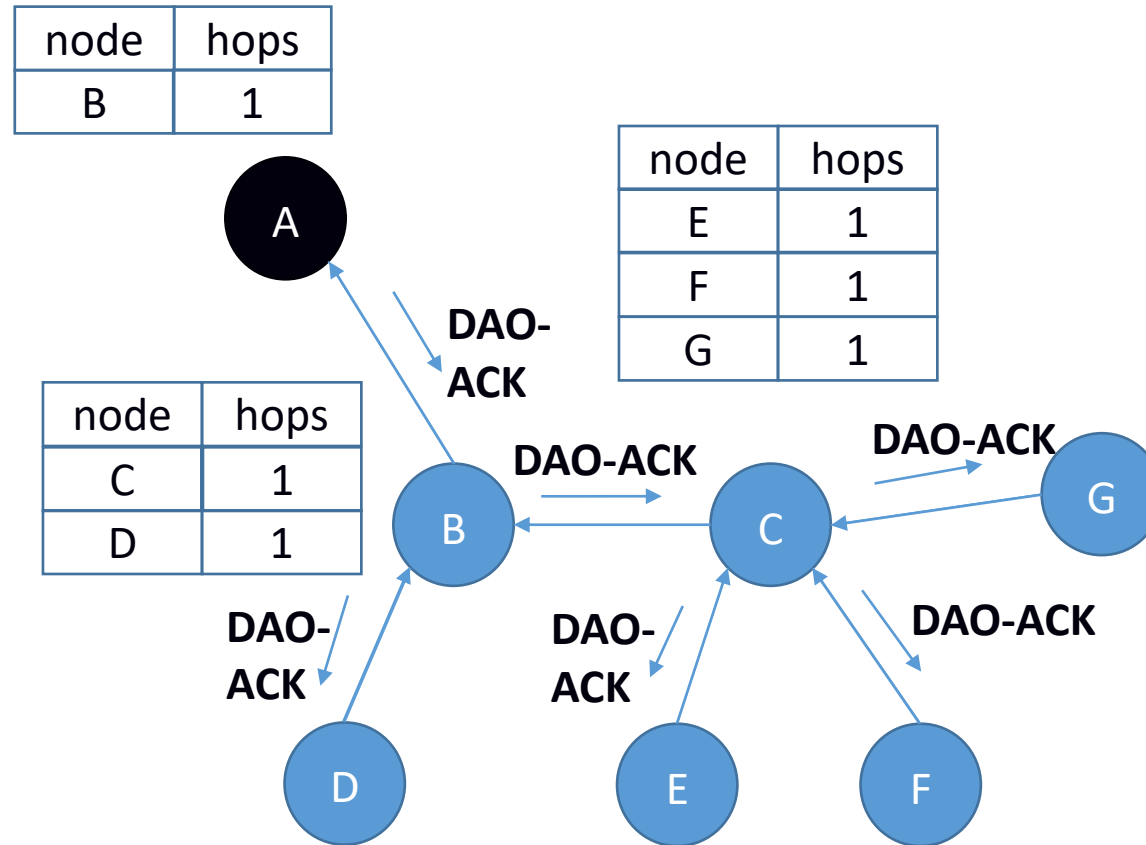
node	hops
E	1
F	1
G	1

node	hops
C	1
D	1

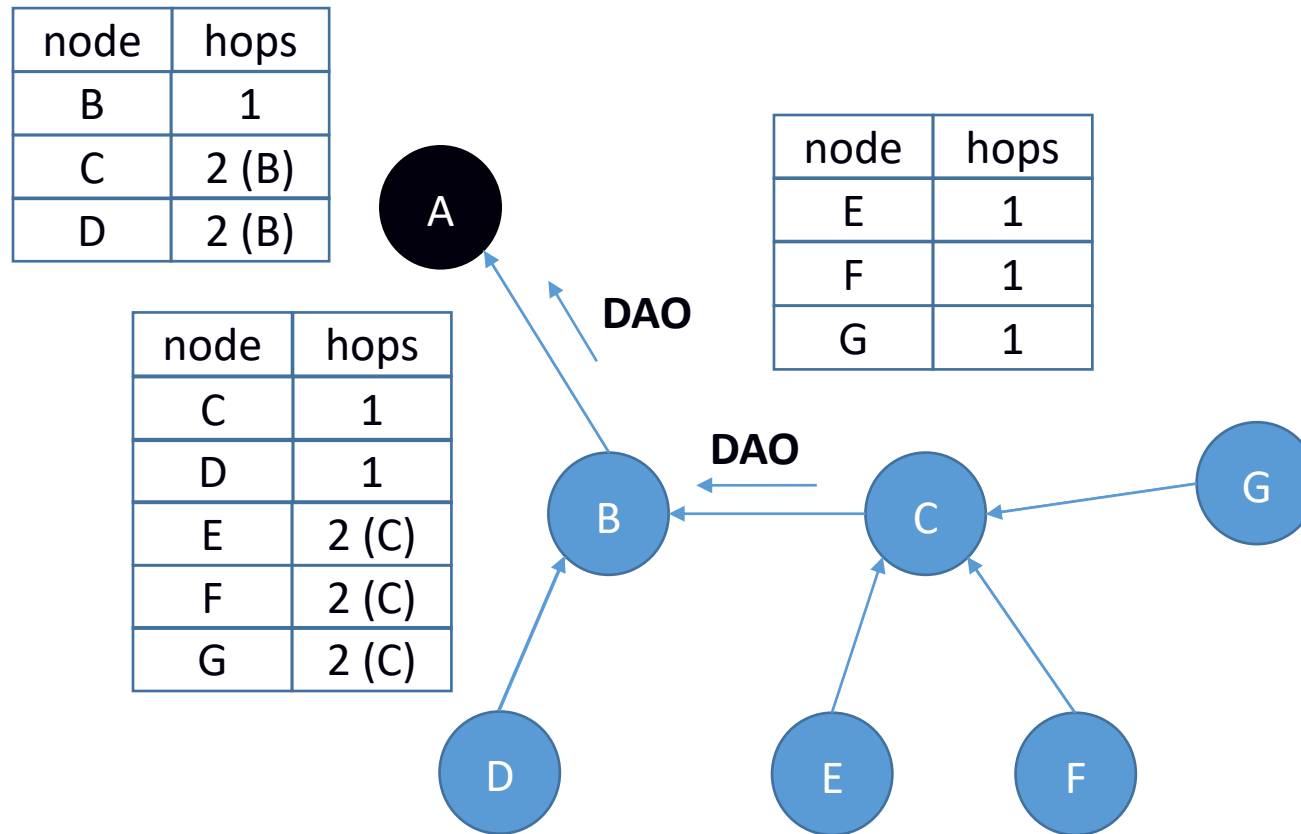


DAO - Destination Advertisement Object  
Šalje čvor svome roditelju za održavanje  
tablice usmjeravanja

# RPL – storing mode (2)



# RPL – storing mode (3)

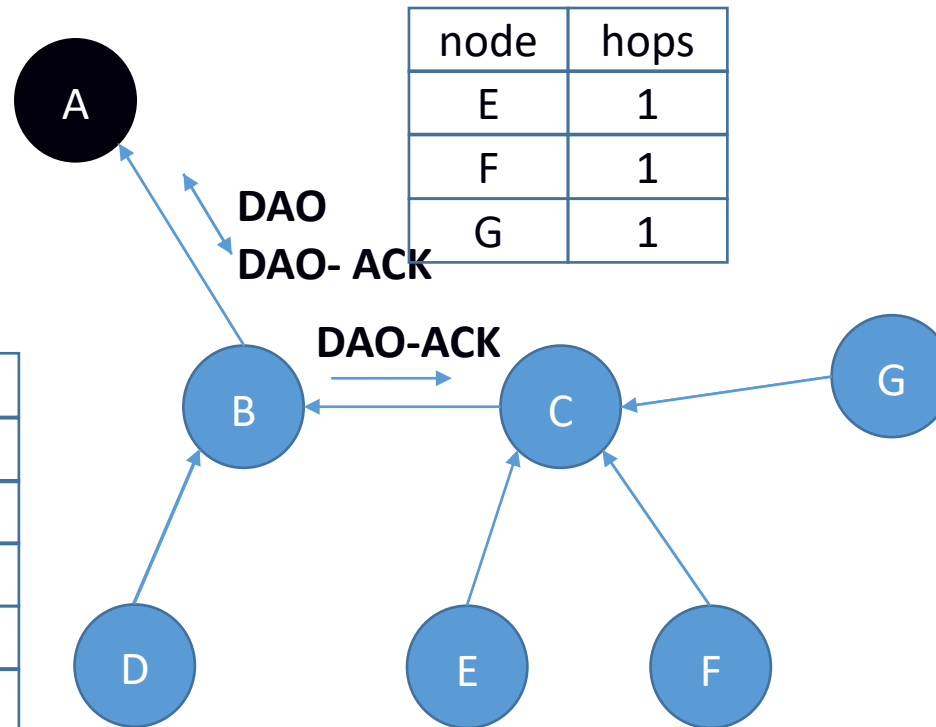




# RPL – storing mode (4)

node	hops
B	1
C	2 (B)
D	2 (B)
E	3 (B)
F	3 (B)
G	3 (B)

node	hops
C	1
D	1
E	2 (C)
F	2 (C)
G	2 (C)



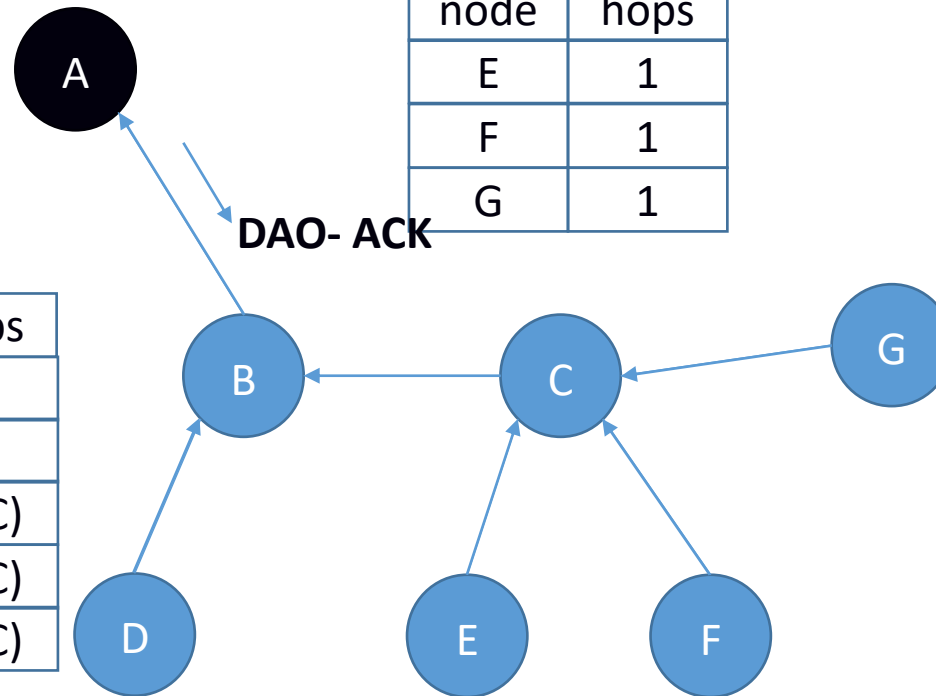
node	hops
E	1
F	1
G	1

# RPL – storing mode (5)

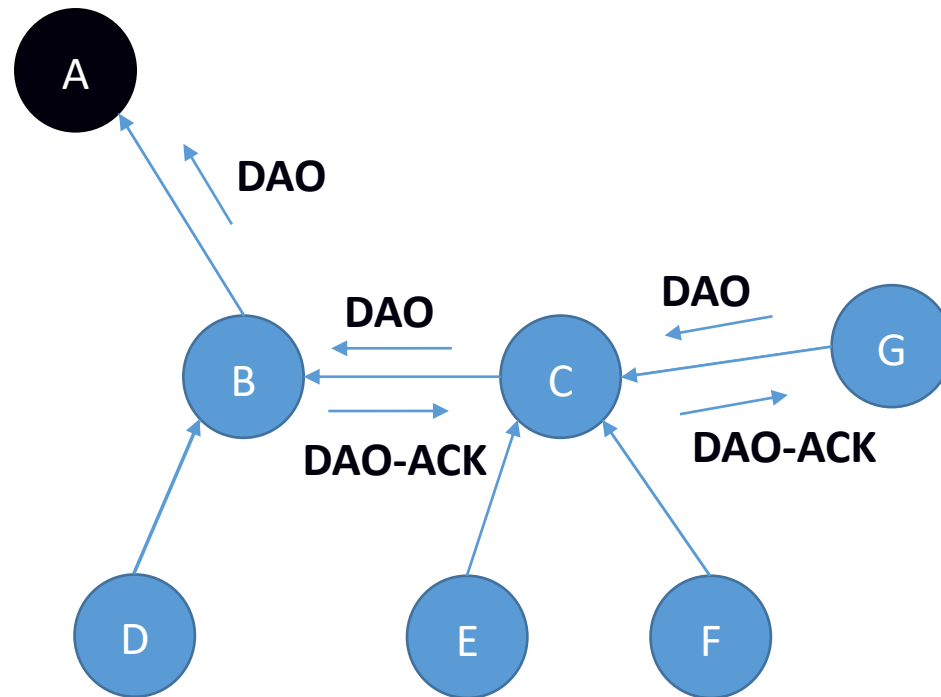
node	hops
B	1
C	2 (B)
D	2 (B)
E	3 (B)
F	3 (B)
G	3 (B)

node	hops
C	1
D	1
E	2 (C)
F	2 (C)
G	2 (C)

node	hops
E	1
F	1
G	1

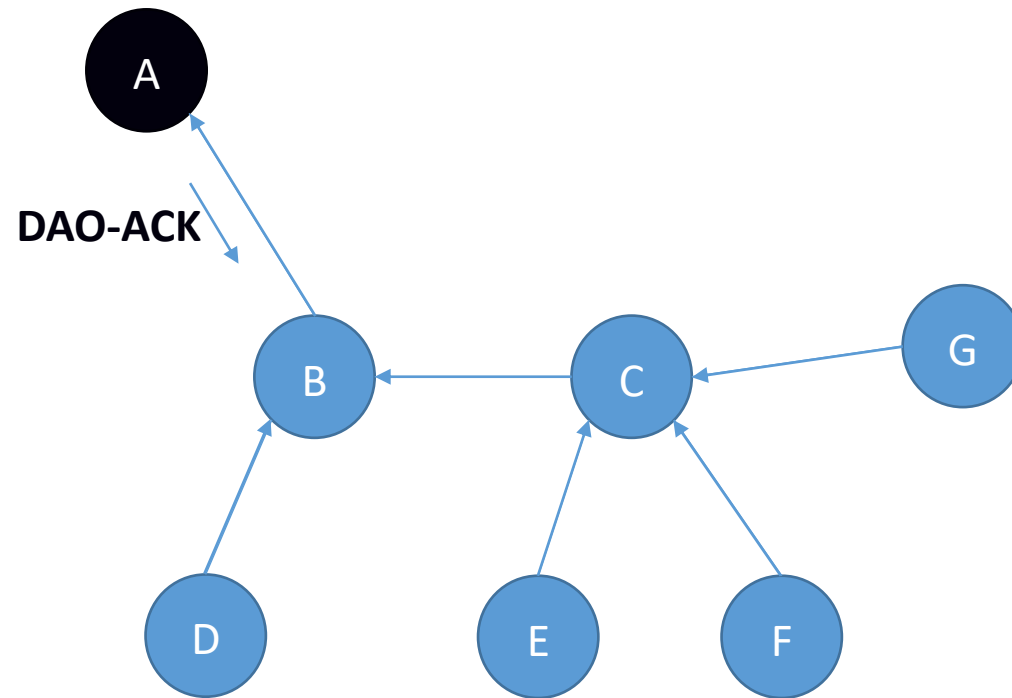


# Non-storing mode (1)



# Non-storing mode (2)

node	hops
B	1
C	2 (B)
D	2 (B)
E	3 (B-C)
F	3 (B-C)
G	3 (B-C)



# Pitanja za ponavljanje

- Navedite obilježja različitih kategorija uređaja ograničenih resursa.
- Koja su obilježja mreže ograničenih resursa?
- Zašto je protokol IP pogodan za umrežavanje uređaja ograničenih resursa?
- Objasnite zašto je potrebna prilagodba protokola IPv6 za uređaje ograničenih resursa koji koriste IEEE 802.15.4. Objasnite mehanizme prilagodbe koje uvodi protokol 6LoWPAN.
- Objasnite što je DODAG i koje vrste čvorova koristi protokol RPL.
- Analizirajte prednosti i nedostatke non-storing modela rada protokola RPL.

# Literatura

1. David Hanes, Gonzalo Salgueiro, Patrick Grossetete, Robert Barton, and Jerome Henry. 2017. IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the Internet of Things (1st ed.). Cisco Press. (5. poglavlje)
2. RFC 4944, Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks, Sept. 2007 <https://tools.ietf.org/html/rfc4944>
3. RFC 6282, Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks, Sept. 2011 <https://tools.ietf.org/html/rfc6282>
4. RPL: <https://www.ietfjournal.org/roll-on-a-roll/>